DOI: 10.22067/jfcei.2022.73934.1098

بررسی قوس زدگی در سدهای سنگریزه‌ای یک دهه پس از پایان ساخت با نتایج تحلیل عددی و مونیتورینگ بدنهٔ سد (مطالعهٔ موردی سد شهید مدنی تبریز، ایران)*

مقاله پژوهشی

رسول فرج نیا[۱] رامین وفایی پورسرخابی[۲] احمد زارعان[۳] روزبه دبیری[٤]

چکیده در تحقیق حاضر، رفتار مکانیکی سد سنگ‌ریزه‌ای شهید مدنی ده سال پس از تکمیل بدنهٔ سد مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. تحلیل عددی سه‌بعدی براساس روش اجزای محدود برای بدنه و تکیه‌گاه سد در نرم‌افزار میداس انجام شد. داده‌های ثبت‌شده توسط ابزارهای واقع در کل بدنهٔ سد با نتایج تحلیل عددی در محل ابزار مقایسه گردید. نشست، فشار آب منفذی، تنش عمودی کلی و کنترل پایداری بدنهٔ سد، پارامترهایی بودند که برای ارزیابی رفتار سد در ده سال پس از پایان ساخت سد، مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد که نشست‌ها، میزان فشار منفذی و تنش کلی به‌دست‌آمده از تحلیل عددی با داده‌های ثبت‌شده توسط ابزارها، منطبق بوده‌است. به‌طوری‌که در رفتار خطی بین داده‌های ابزار دقیق و تحلیل عددی در مورد نشست، فشار منفذی و تنش کل ضرایب همبستگی به‌ترتیب ٦٧/٨٤ و٩٩ درصد به‌دست آمدند. پارامترهای فشار منفذی و تنش کل برای کنترل شکست هیدرولیکی هسته مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج ماکزییمم مقدار نشست حاصل از تحلیل‌های عددی و ابزار دقیق به‌ترتیب ۱/۷۹ و ۱/۹۰ متر، برای فشار منفذی٤٥٠ و٤٢٠ کیلوپاسکال، برای تنش کل ١٤٤٠و١٢٠٥ کیلوپاسکال به‌دست آمده‌است. با محاسبات صورت‌گرفته ماکزییمم نسبت ضریب قوس در سد شهید مدنی حاصل از قرائت ابزار دقیق و تحلیل عددی به‌ترتیب ۰/۷۷ و ۰/۹۱ بود که هر دو کمتر از عدد یک است، هم‌چنین حداکثر R_u حاصل از تحلیل عددی و ابزار دقیق نصب‌شده در هسته به‌ترتیب ۰/۳۵ و ۰/٤۷ می‌باشد که کمتر از مقدار پیش‌بینی‌شده در مرحلهٔ طراحی ۰/۵ می‌باشند. بنابراین احتمال وقوع قوس‌زدگی هسته وجود ندارد، که نشان می‌دهد سد از نظر شکست هیدرولیکی در محدودهٔ امن قرار دارد.

واژه‌های کلیدی سد سنگ‌ریزه‌ای، اجزای محدود، فشار منفذی، قوس‌زدگی، شکست هیدرولیکی.

مقدمه

رفتار سدهای خاکی در پایان ساخت و بهره‌برداری از مسائل مهم در زمینهٔ رفع خرابی هیدرولیک است که می‌تواند خطرات جدی را برای سدها و تأسیسات مربوط به‌همراه داشته باشد. به‌دلیل عدم قطعیت در خواص مواد، نتایج تحلیل عددی ممکن است به نحوی با نتایج ارائه‌شده توسط ابزارها متفاوت باشد. بنابراین، تجزیه و تحلیل سدها در پایان ساخت‌وساز ضروری است [1]. سدهای خاکی و سنگی به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین سازه‌های خاکی محسوب می‌شوند. هزینه‌های ساخت و آسیب‌های جبران‌ناپذیر به‌دلیل خرابی آن‌ها باعث شده‌است که عملکرد آن‌ها به‌طور مداوم مورد ارزیابی و نظارت قرار گیرد. نظارت به‌معنای بررسی عملکرد یک سازه در پایان ساخت و مرحلهٔ بهره‌برداری و سازگاری آن با پیش‌بینی‌های زمان طراحی است. [2] با طراحی سیستم نظارتی و نصب ابزارهای مربوط در بدنهٔ سد در حین ساخت‌وساز، نشست‌ها، تنش‌ها و فشار آب منفذ را می‌توان اندازه‌گیری کرد. تحلیل داده‌های ثبت شده توسط ابزارها نه تنها به درک تنش ها و نشست‌های پیچیده در بدنهٔ سد کمک می‌کند، بلکه می‌تواند مبنای مناسبی برای تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی از طریق تحلیل برگشتی باشد. این داده‌ها را می‌توان با نتایج عددی مقایسه کرد تا دقت تحلیل عددی ارزیابی شود [3]. باتوجه به

---

* تاریخ دریافت مقاله ١٤٠٠/٩/١٤ و تاریخ پذیرش آن ١٤٠١/١/١٦ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری،گروه عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.
(۲) نویسنده مسئول: استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران. **Email**: raminvafaei@yahoo.com
(۳) استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد شبستر، دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر، ایران.
(٤) استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران.

استانداردهای سد خاکی، به‌شرطی‌که بین نتایج تحلیل عددی و نتایج ارائه‌شده توسط ابزارها تفاوت قابل توجهی وجود داشته باشد، انجام یک تحلیل برگشتی برای اصلاح ویژگی‌ها و مفروضات مواد ضروری است [4]. افزایش فشار آب منفذ در بدنهٔ سدها باعث کاهش تنش مؤثر و درنتیجه کاهش مقاومت برشی مواد بدنهٔ سد می‌شود که می‌تواند نتایج خطرناکی را به دنبال داشته باشد و باعث ناپایداری سدهای خاکی شود [5]. کنترل پایداری سدها براساس بلایای طبیعی مانند زلزله، سیل، رانش زمین و طراحی ضعیف یا عدم نگهداری مناسب باید مورد توجه قرار گیرد [6]. هم‌چنین ارزشیابی پایداری شیب حاصل از مدل‌سازی عددی باید با مقدار ضریب اطمینان مجاز کنترل شود [7]. از نتایج ابزارهای نصب‌شده در بدنهٔ سد، میزان نشست اشباع ناشی از اولین آبگیری مخزن سد در پوستهٔ بالادست سد قابل تعیین است [8]. پایداری بدنهٔ سدهای سنگ‌ریزه‌ای بااستفاده از مدل‌سازی عددی قابل تخمین است [9]. براساس مطالعات انجام گرفته حداکثر نشست در بلندمدت و قوس‌دهی تقریباً در وسط هستهٔ سد رخ می‌دهد [10]. ضمناً با مطالعات صورت‌گرفته مشخص شده‌است که ۸۸ درصد از کل نشست سد در حین ساخت سد صورت گرفته‌است [11]. باتوجه به تفاوت خواص مصالح هسته و پوسته، نشست‌های ناهمگن بین بخش‌های مختلف سد رخ می‌دهد. این عمل منجر به پدیدهٔ قوس‌زدگی می‌شود که باعث ایجاد برخی ترک‌ها در سطح مقطع غیر قابل نفوذ بدنهٔ سد، به‌ویژه در نزدیکی محل اتصال به دیوارهای جانبی در اولین دورهٔ آبگیری می‌شود که با اعمال فشار آب مخزن به هسته، می‌تواند توسعه یابد و سرانجام و در شرایط بحرانی‌تر منجر به خرابی و شستشوی هیدرولیکی بدنهٔ سد می‌شود [12]. مطالعهٔ شکست هیدرولیکی در هستهٔ سدهای خاکی از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی و تحلیل عددی ارزیابی شده‌است که نشان می‌دهد CL مستعد شکست هیدرولیکی است بنابراین استفاده از GM-GC برای هستهٔ سدهای خاکی توصیه شده‌است[13]. سد شهید مدنی یک سد با مصالح سنگی است که در نزدیکی شهر تبریز در ایران ساخته شده‌است. تبریز در منطقه ای با پتانسیل لرزه‌خیزی بالا قرار دارد. تأمین آب شیرین بدون شوری هدف اصلی ساخت این سد بوده‌است. در این حوضه چند شاخه رودخانه از جمله آب شیرین و آب شور وجود دارد. برخی از سدهای تبخیری در رودخانه‌های آب شور ساخته شده‌است تا از سرازیر شدن آن‌ها به مخزن سد شهید مدنی جلوگیری شود. در تحقیق حاضر ضمن کنترل وضعیت پایداری بدنهٔ سد بااستفادهٔ هم‌زمان از تحلیل عددی و ابزار دقیق، شامل کنترل پارامترهای نشست، تنش قائم و فشار منفذی بدنهٔ سد، به کنترل تغییرات ضرایب فشار منفذی هسته و مقدار ضریب قوس‌زدگی نیز پرداخته شده‌است و احتمال وقوع قوس‌زدگی هسته و بروز شکست هیدرولیکی سد سنگ‌ریزه‌ای تا یک دهه پس از پایان ساخت بررسی شده‌است.

روش تحقیق

مشخصات سد

سد شهید مدنی سدی سنگ‌ریزه‌ای با هستهٔ رسی است که بر روی رودخانهٔ آجی‌چای (تلخینه‌رود) در ۵ کیلومتری شمال شرقی تبریز ساخته شده‌است. این سد دارای طول تاج ۲۷۷ متر و ارتفاع بزرگ‌ترین قسمت پی (بخش میانی) معادل ۹۱ متر است. تراز تاج سد ۱۵۰۴ (از سطح دریا) و تراز نرمال مخزن ۱۴۹۸ متر از سطح دریا و حجم مخزن در سطح نرمال ۳۶۱ میلیون مترمکعب است. عمق حفاری ۵۲ متر در بستر رودخانه تا سنگ بستر انجام گرفته‌است. دو لایه فیلتر در بالادست و پایین‌دست از هستهٔ رسی عمودی و پوستهٔ سنگی که بین هستهٔ رس و پوستهٔ سنگ‌ریز قرار دارد. علاوه‌بر این، یک رویه بالادست توسط مصالح ریپ رپ پوشش داده شده‌است. ابزارهای رفتارسنجی شامل نشست‌سنج ها، سلول‌های فشار و پیزمتر در پنج سطح مقطع در ارتفاع سد قرار گرفته‌است. ساخت سد در سال ۲۰۰۲ آغاز شد و در سال ۲۰۱۱ به پایان رسید. قرائت ابزارها در سال ۲۰۰۳ شروع شد و داده‌ها در طول ساخت بدنهٔ سد به‌طور مداوم ثبت می‌شدند. اکثر ابزارها در هستهٔ رس متمرکز شده‌اند. در شکل (۱) نمای پلان و محورهای جانمایی ابزار دقیق در پلان سد شهید مدنی نشان داده شده‌است.

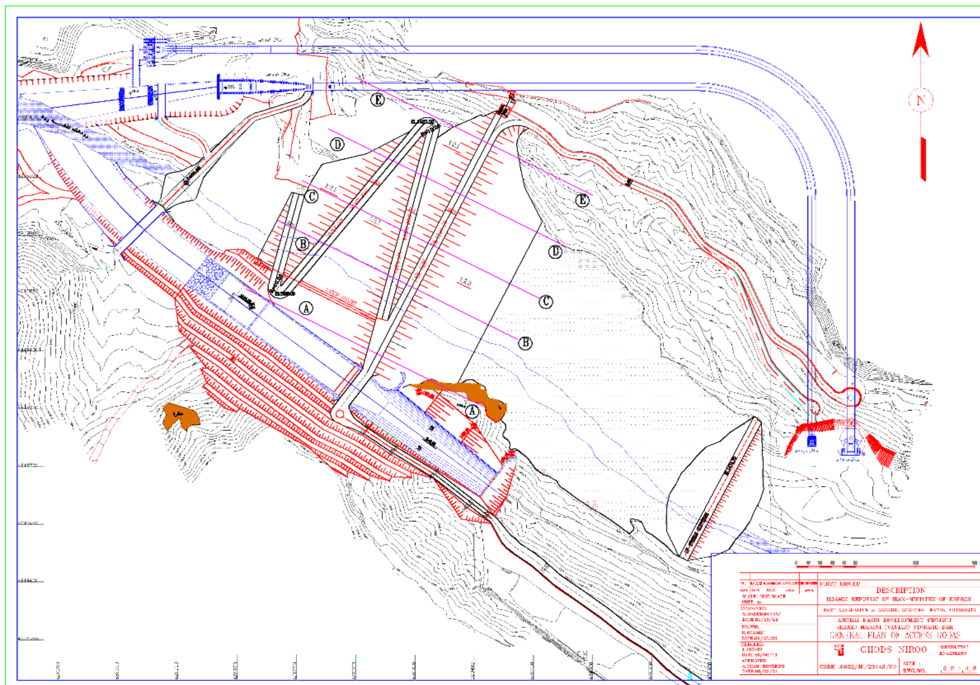
در جدول (۱) مشخصات بدنهٔ سد و مخزن سد شهید مدنی نشان داده شده‌است [14].

پایش به‌منظور ارزیابی عملکرد سد از نظر ایمنی، مقایسهٔ

رفتار واقعی با پیش‌بینی‌های زمان طراحی و تجربه در طراحی‌های آینده ضروری به‌نظر می‌رسد. نظارت با نصب ابزارهای مناسب در مناطق حساس و اندازه‌گیری پارامترهای مختلف مانند فشار منفذی، تغییرشکل، تنش کلی امکان‌پذیر است [15]. به‌منظور کنترل و مراقبت از عملکرد و رفتار سد شهید مدنی، سیستم نظارتی باتوجه به ویژگی‌های بدنهٔ سد و وضعیت زمین‌شناسی فونداسیون در نظر گرفته شده‌است. برای نظارت بر سد شهید مدنی در مرحلهٔ طراحی، پنج سطح مقطع ابزار به‌گونه‌ای پیش‌بینی شده‌است که به‌راحتی قابل خواندن و کنترل هستند. در شکل (۲) مقطع طولی بدنه با قرارگیری مقاطع ابزار و تصویر بزرگ‌ترین مقطع بدنهٔ سد نشان داده شده‌است.



(الف)

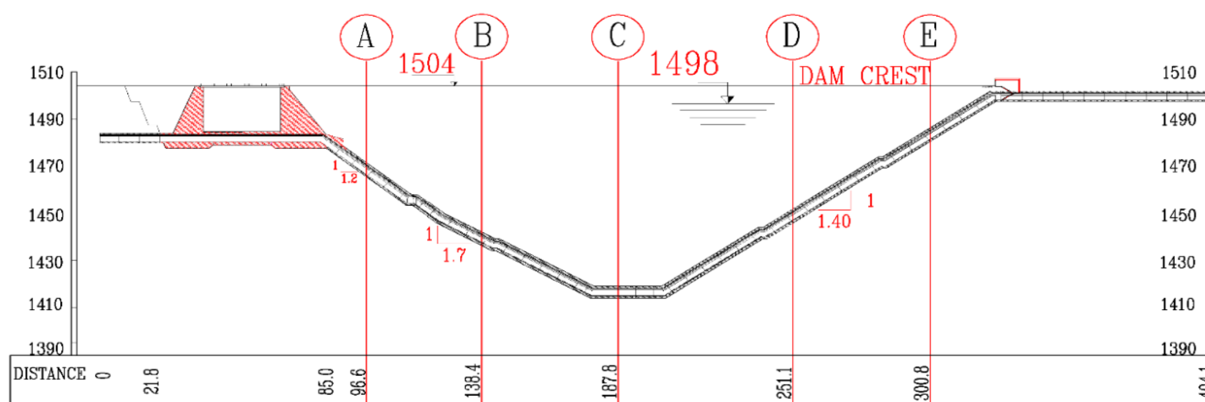


(ب)

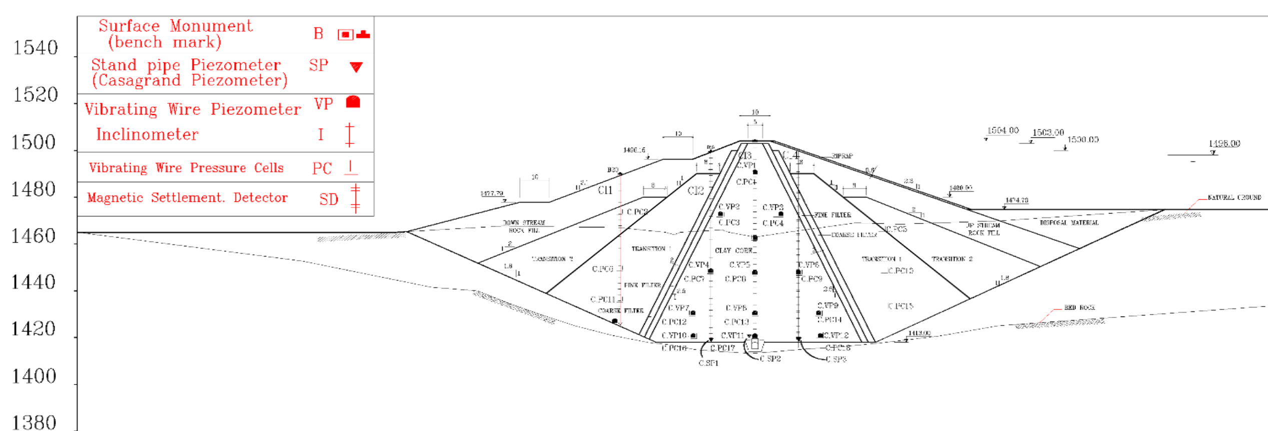
شکل ۱ سد شهید مدنی : (الف) نمای پلان، (ب) محورهای ابزارگذاری در پلان

جدول ۱ مشخصات فنی سد و مخزن شهید مدنی

جزئیات بدنهٔ سد	مقدار
ارتفاع تاج سد از سنگ بستر	۹۱ متر
ارتفاع تاج سد از بستر رودخانه	۳۹ متر
تراز تاج سد	۱۵۰٤ متر
تراز رقوم نرمال	۱٤۹۸ متر
طول تاج سد	۲۷۸ متر
عرض تاج سد	۱۰ متر
حجم مخزن سد	۳٦۱ میلیون مترمکعب
حجم مصالح بدنهٔ سد	۱/۷ میلیون مترمکعب
شیب بالادست بدنهٔ سد	۱ به ۲/۳
شیب پایین دست بدنهٔ سد	۱ به ۲/۱
مساحت مخزن سد	۱۲/۳۳ کیلومترمربع



(الف)



(ب)

شکل ۲ سد شهید مدنی: (الف) مقطع طولی بدنه با قرارگیری مقاطع ابزار، (ب) بزرگ‌ترین مقطع بدنهٔ سد

ده سال پس از اتمام ساخت پروژه، بااستفاده از اطلاعات بیش از ۵۰۰ ابزار نصب‌شده در بدنۀ سد (ارتفاع ۹۱ متر در سطح ۱۵۰٤)، تمام اطلاعات شامل فشار منفذی هسته، میزان نشست قایم و تنش‌های ایجادشده خوانده می‌شود. درمجموع ۱۲۰ سلول فشار کلی (PC)، ٦٢ پیزوالکتریک (VP)، ٢٧ پیزومتر casgrandeh (SP)، ۱۷ انحراف‌سنج (I)، ٢٧٥ نشست‌سنج (SD) در بدنۀ سد نصب شده‌است. ابزار دقیق بدنۀ سد در سال ۲۰۰۳ شروع به کار کرد و داده‌ها در طول ساخت به‌طور مداوم ثبت شد. اکثر ابزارها در هستۀ رس متمرکز شده‌اند [3]. شکل (۳) نمایی از محفظه و سیستم‌های کنترل مرکزی تجهیزات الکترونیکی نصب‌شده در بدنه و نحوۀ قرائت دستی تجهیزات مکانیکی در بدنۀ سد شهید مدنی را نشان می‌دهد.

خواص مصالح مورد استفاده در تحلیل عددی از آزمایش‌های مکانیک خاک بر روی مصالح ریز و درشت‌دانه استخراج شده‌است. پارامترهای مدل الاستو و پلاستیک برای شبیه سازی پی آبرفتی، سنگ بستر و مواد دیزپوزال از آزمایشگاه و آزمایش‌های میدانی استخراج شده‌است. مدل رفتاری موهر کولمب به‌عنوان سطح تسلیم برای شبیه‌سازی رفتار مکانیکی فونداسیون، مواد آبرفتی و دیزپوزال استفاده شد. در جدول (۲) پارامترهای هیدرولیکی مدل برای نواحی مختلف سد نشان داده شده‌است.

در این جدول پارامترهای γ_{sat} (KN/ m³)، γ_d (KN/ m³)، K(m/s)، φ(deg)، C(KPa)، ν و E(MPa) براساس مدل رفتاری موهر کولمب، به‌ترتیب وزن مخصوص خشک، وزن مخصوص اشباع، ضریب نفوذپذیری، زاویۀ اصطکاک داخلی، چسبندگی مصالح، نسبت پواسون و مدول الاستیسیته مصالح می باشند.


(الف)


(ب)

شکل ۳ سد شهید مدنی : (الف) نمای کنترل مرکزی تجهیزات الکترونیکی مونیتورینگ، (ب) نحوۀ خواندن دستی تجهیزات مکانیکی

جدول ۲ پارامترهای مقاومت بدنه، پی و مصالح سد

پارامترهای مصالح بدنه	γ_d (KN/ m³)	γ_{sat} (KN/ m³)	K*10⁻⁶ (m/s)	φ (deg)	C (KPa)	(ν)	E (MPa)
هستهٔ رسی	۱۹	۲۰	۰/۰۰۰۵	۲۸	٤۰	۰/۳	۲۰
فیلتر	۲۰	۲۱	۰/۰۰۰۱	۳۳	۰	۰/۲٥	٤۰
پوسته	۲۱	۲۲	۱۰۰۰	٤٤	۰	۰/۲٥	۷۰
ناحیهٔ انتقالی	۲۰	۲۱	۰/۰۰۰۱	۳۸	۰	۰/۲٥	٥۰
مصالح دیزپوزال	۱۹/۲	۱۹/۸	۰/۰۰۰۰۰۱	۲۸	۲۰	۰/۳	۱٥
پی آبرفتی	۱۸/٥	۱۹/٥	۰/۰۰۰۰۰۰۰۱	۲۰	۲۰	۰/۳	٤۰
سنگ بستر	۲۱	۲۲	۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۱	۲۸	۸۰	۰/۲٥	۲۰۰

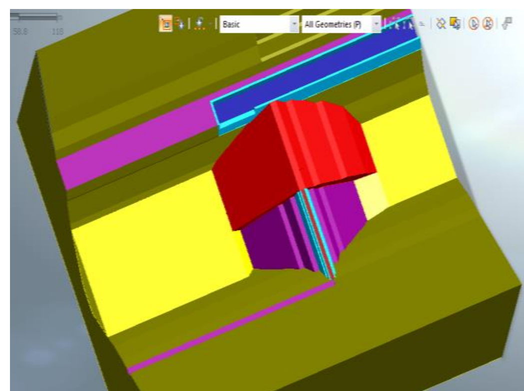
مدل‌سازی و تحلیل عددی

تحلیل عددی سه‌بعدی سد شهید مدنی بااستفاده از نرم‌افزار المان محدود Midas-GTS.2019V2.1 انجام شده‌است. این نرم‌افزار یک نرم‌افزار تخصصی ژئوتکنیک و برای تحلیل سدهای خاکی–سنگ‌ریزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل‌سازی دقیق، تحلیل آسان و سرعت بالا از مزایای این نرم‌افزار است. مراحل اولیهٔ کار در این برنامه ایجاد هندسهٔ مدل سد بااستفاده از شرایط مرزی است. در مدل‌سازی، برای بستر و بدنهٔ سد، از مدول رفتاری موهرکولمب استفاده شد. شکل درّه بر توزیع تنش در سد خاکی تأثیر می‌گذارد، در درّهٔ U شکل، شرایط کرنش صفحه یک ملاحظهٔ منطقی است و تجزیه و تحلیل دوبعدی به‌نوعی رفتار مکانیکی سد را توضیح می‌دهد. برعکس، در دره‌ای V شکل، این فرض از واقعیت دور است و نیاز به مدل‌سازی سه‌بعدی از سد خاکی دارد. برخی از محققان اظهار داشته‌اند که مدل‌سازی دوبعدی یک سد خاکی به‌شرطی‌که نسبت طول به ارتفاع سد خاکی بیشتر از ٦ باشد منجر به نتایج مناسب می‌شود [16]. برای سد شهید مدنی، این نسبت حدود ۳/۱ (طول ۲۸٦ متر و ارتفاع ۹۱ متر) بود. درنتیجه برای رسیدن به نتایج دقیق سد شهید مدنی، یک مدل‌سازی سه‌بعدی مورد نیاز بود. بنابراین تحلیل‌های انجام شده در این نرم‌افزار، سه‌بعدی بوده و برای مدل‌سازی از شبکه‌های مثلثی استفاده شده‌است. زمان احداث سد کاملاً مطابق گزارش‌های دریافتی از دوران ساخت سد است. شبیه‌سازی عددی شامل سه مرحله می‌باشد. در مرحلهٔ اول برای محاسبهٔ تنش‌های درجا، باید بستر رودخانه را قبل از ساخت سد مدل‌سازی کرد. در این مرحله، تنش‌های افقی با اعمال ضریب فشار جانبی در حالت سکون برآورد شد. در مرحلهٔ دوم قبل از شروع ساخت سد، نیاز به مدل‌سازی حفاری ترانشه حفاری‌شده برای رسیدن به سنگ بستر بود. حفاری ترانشه‌ها در ۱۰ لایه در نرم‌افزار شبیه‌سازی شد. در مرحلهٔ سوم، ساخت سد از سنگ زیرین تا قلهٔ سد شامل دو مرحله است:

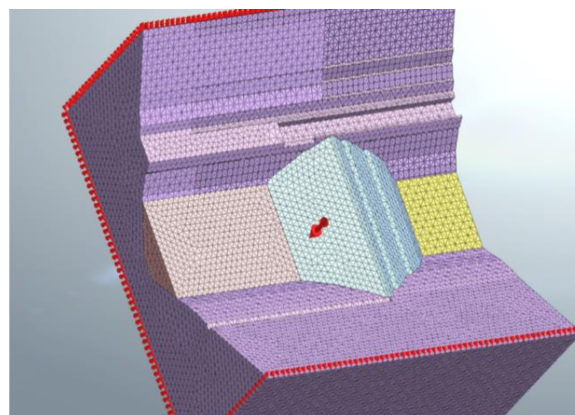
مرحلهٔ ۱. ساخت سد از سنگ بستر (۱٤۱۳ متر) تا سطح بستر رودخانه (۱٤۷۷ متر) که در ۱۰ لایه با ضخامت ٦/٤ متر در نرم‌افزار شبیه‌سازی شد و از نظر فیزیکی حدود ٦ سال به طول انجامید. سطح آب زیرزمینی در محل سد تقریباً سطح بستر رودخانه بود. هنگامی‌که ارتفاع سد به ۳۷ متر از سنگ زیرین رسید، اجازه داده شد آب زیرزمینی به بدنهٔ سد نفوذ کند. در این مرحله هستهٔ سد بدون زهکشی یکپارچه (CU) فرض شد. به‌دلیل نفوذپذیری کم هستهٔ رس، مواد رس به‌تدریج اشباع شد درحالی که سطح آب در پوسته و پی آبرفتی به‌دلیل نفوذپذیری بیشتر این مواد نسبت‌به هستهٔ رس، ثابت ماند. پس از اشباع شدن هستهٔ رسی و هنگامی‌که سطح خاکریزی به سطح بستر رودخانه رسید، حالت پایداری از تراوش پدیدار شد.

مرحلهٔ ۲. ساخت سد از سطح بستر رودخانه تا قلهٔ سد (۱٥۰٤ متر) که در پنج لایه شبیه‌سازی شده‌است. در این مرحله، عملیات ساخت‌وساز حدود ۳ سال به طول انجامید و هستهٔ رس بدون زهکشی (CU) فرض شد. هنگامی‌که سطح آب برای اولین بار به ۳۹ متر بالاتر از سنگ بستر رسید (۲۱ مه ۲۰۰٥)، تمام پیزومترها شروع به ثبت فشار منفذی در هستهٔ سد کردند. زمان شروع ضبط داده‌ها و انجام تجزیه و تحلیل وابسته به زمان بود. عملیات تحکیم و تنش در بدنهٔ سد ده سال پس از اتمام ساختمان بدنهٔ سد در تحلیل عددی در نظر گرفته می‌شود. در آغاز مرحلهٔ دوم، سطح آب در هسته به حالت ثابتی رسید.

در تحلیل تنش اولیه، جابه‌جایی اولیهٔ تکیه‌گاه صفر در نظر گرفته می‌شود. براساس تجزیه و تحلیل حساسیت، اندازهٔ مش ۱ در نظر گرفته می‌شـــود. ابعاد و مرزهای افقی و عمودی برای ایجاد هندســهٔ مدل براســاس تحلیل حســاســیت در نظر گرفته می شود. در شکل (٤) مدل سازی و مش‌بندی سه‌بعدی نشان داده شده‌است.



(الف)



(ب)

شکل ٤ مدل عددی سد شهید مدنی: (الف) مدل سه‌بعدی، (ب) مدل شبکه سه‌بعدی

تحلیل عددی شامل تجزیه و تحلیل تنش، جابه‌جایی و فشار منفذی برای ارزیابی احتمال وقوع شکست.هیدرولیکی بدنهٔ سد است. در این بخش، نتایج تحلیل عددی سد شهید مدنی شامل نشست‌ها، تنش‌های عمودی کل، فشار آب منفذی و نسبت قوس با داده‌های ثبت‌شدهٔ به‌دست‌آمده از ابزارها مقایسه می‌شود.

آنالیزها

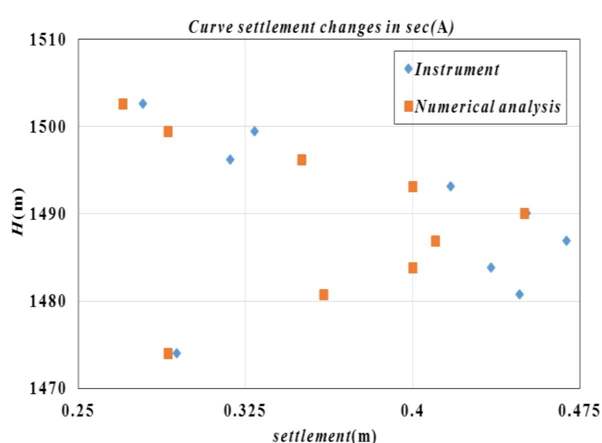
در این بخش، نتایج تحلیل عددی سد شهید مدنی شامل نشست‌ها، تنش‌های عمودی کل و فشار آب منفذی با داده‌های ثبت‌شدهٔ به‌دست‌آمده از ابزارها مقایسه می‌شود.

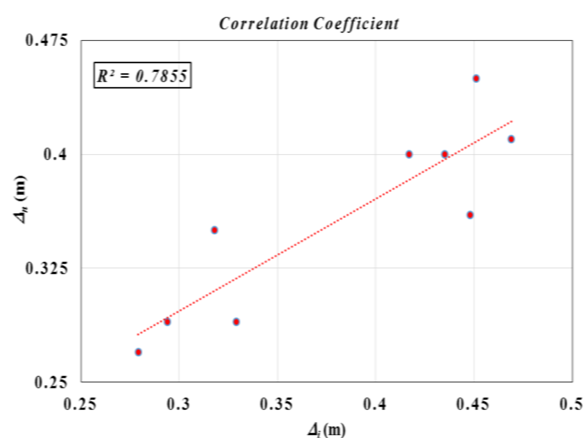
بررسی نتایج نشست‌های بدنهٔ سد. نشست‌سنج‌های داخلی سد در سه گروه عمودی، افقی و حرکتی چرخشی طبقه‌بندی می‌شوند. حرکات عمودی، نشست‌ها را از نظر وزن مصالح، فشردگی و تثبیت بدنهٔ سد نشان می‌دهد. حرکت‌های افقی، عمدتاً به حرکت‌های بالادستی که در زمان اولین آبگیری در مخزن سد رخ می‌دهد اشاره دارد که به‌دلیل کاهش سریع‌تر تنش مؤثر در مصالح بالادست نسبت‌به سایر قسمت‌های سد است. حرکت پایین‌دست به‌دلیل فشار افقی آب مخزن سد است. علاوه‌بر این، حرکات چرخشی که در دامنه‌های بالادست و پایین‌دست ظاهر می‌شوند به‌دلیل مقاومت برشی کمتر مواد در پی یا بدنهٔ سد است. استفاده از نقاط نقشه‌برداری، شیب‌سنج‌ها (لوله‌های استقرار) و نشست‌سنج قایم یک روش معمول برای اندازه‌گیری این تغییر شکل‌ها در سدهای خاکی است. برای بررسی جابه‌جایی عمودی بدنهٔ سد، از یک سری صفحات مغناطیسی که در فواصل مختلف داخل لولهٔ نشست‌سنج نصب شده‌اند استفاده شده‌است. پایین ترین صفحه، که صفحهٔ پایه است، بر روی پایهٔ سنگی نصب شده‌است که کمترین جابه‌جایی در آن رخ می‌دهد و این نقطه تقریباً ثابت است. پایداری دامنه‌های خاکی با ارزیابی تغییر شکل قسمت‌های مختلف بدنه امکان‌پذیر است. به‌منظور ارزیابی تغییر شکل‌های عمودی در سد شهید مدنی، از ۱۷ انحراف‌سنج (I) و ۲۷۵ نشست‌سنج (SD) (صفحات استقرار مغناطیسی) در سطوح مختلف بدنهٔ سد استفاده شده‌است. در تحقیق حاضر، مقدار حداکثر تغییرشکل عمودی حاصل از نتایج ابزار نشست‌سنج و تحلیل‌های عددی در مقاطع سد A، B، C، D و E سد شهید مدنی در جدول (۳) نشان داده شده‌است. مقدار نشست‌های عمودی به‌دست‌آمده از داده‌های ثبت‌شده توسط ابزار دقیق بیشتر از مقادیر به‌دست‌آمده از تحلیل‌های عددی است. به‌طور کلی تناسب خوبی بین این اعداد وجود دارد.

حداکثر میزان نشست عمودی پس از ده سال از پایان ساخت بدنهٔ سد شهید مدنی به‌ترتیب نتایج تحلیل عددی و ابزار نصب‌شده در بدنهٔ سد در مقطع عرضی (C)، 1/79و1/90(متر) است. دلیل این‌که میزان نشست عمودی حاصل از نتایج ابزار دقیق در همهٔ مقاطع بیشتر از میزان تحلیل عددی است، ناشی از وقوع چندین زمین‌لرزهٔ طبیعی در منطقهٔ آذربایجان طی ده سال گذشته است. در ادامه به‌ترتیب منحنی‌های تغییرات نشست در ارتفاع بدنهٔ سد و ضریب همبستگی بین داده‌های حاصل از نتایج ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی برای هر پنج مقطع اصلی بدنهٔ سد در شکل‌های (۵) نشان داده شده‌است.

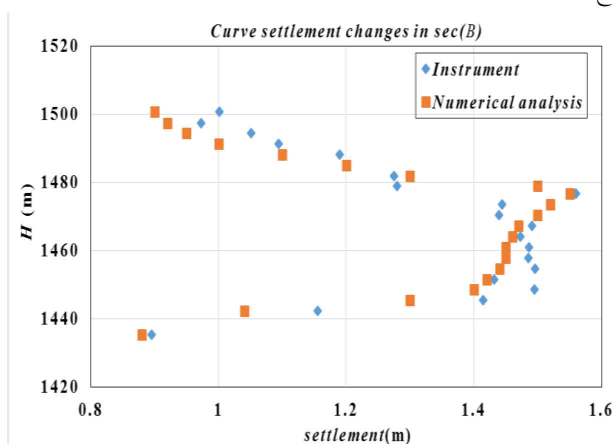
جدول ۳ حداکثر نشست عمودی حاصل از تجزیه و تحلیل عددی و ابزار در مقاطع بدنهٔ سد

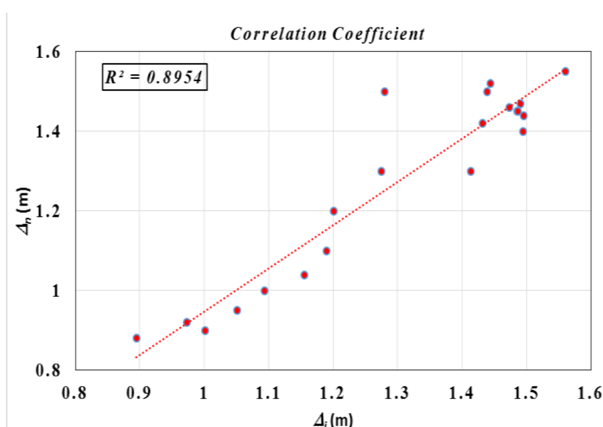
ماکزیمم مقدار نشست حاصل از ابزار دقیق (متر)	ماکزیمم مقدار نشست حاصل از آنالیز (متر)	نام مقطع عرضی
۰/٤٦٩	۰/٤٥	A
۱/٥٦	۱/٥٥	B
۱/۹۰	۱/۷۹	C
۱/۳۳	۱/۳	D
۱/۱۷	۱/۱	E



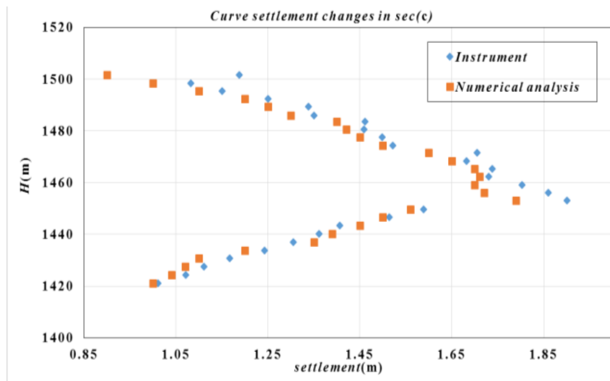


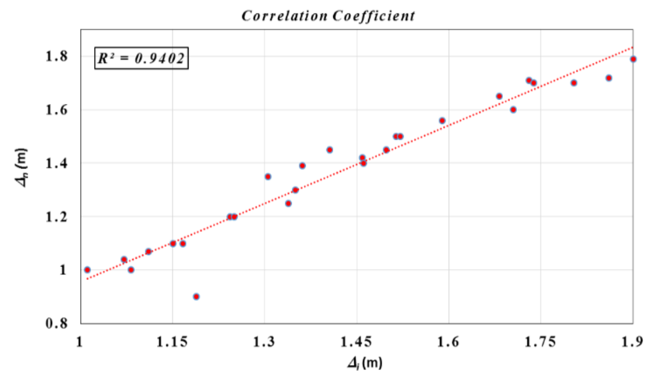
(الف) مقطع A



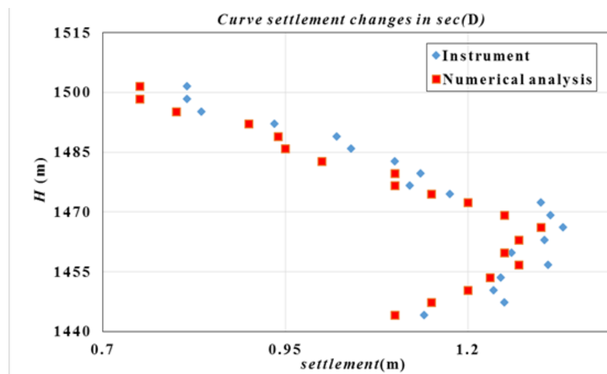


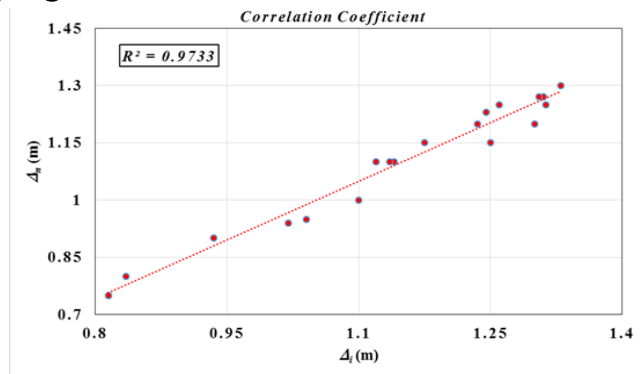
(ب) مقطع B



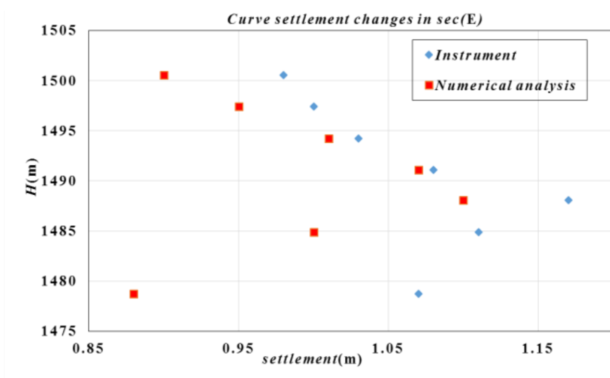


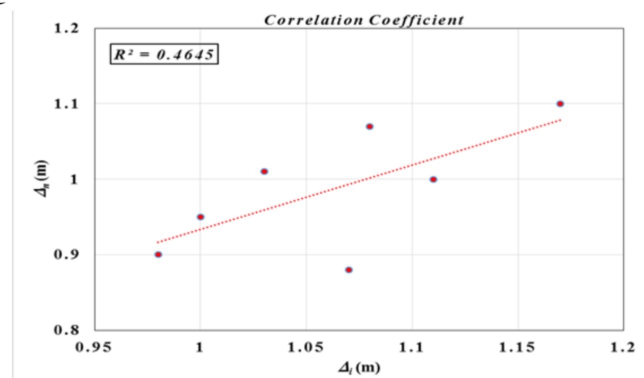
(ج) مقطع C





(د) مقطع D





(ی) مقطع E

شکل ۵ مقایسهٔ منحنی‌های نشست و ضریب همبستگی در مقاطع بدنهٔ سد

در منحنی‌های فوق H نشان‌دهندهٔ ارتفاع قرارگیری صفحات نشست‌سنج‌ها در تراز بدنهٔ سد و Settlement نشان دهندهٔ مقدار نشست بدنهٔ سد در جهت قائم است. ضریب همبستگی بین داده‌های نشست حاصل از نتایج ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی برای پنج مقطع ابزارگذاری‌شده بیش از ۸۳/۸ صدم درصد می‌باشد که نشان‌دهندهٔ همبستگی مناسب بین داده‌های نشست می‌باشد.

تنش قایم و نسبت قوس‌زدگی. سلول‌های فشار در ترازهای مختلف بدنهٔ سدهای خاکی- سنگ‌ریزه‌ای به بررسی تغییرات میزان تنش کل در نقاط مختلف بدنهٔ سد می‌پردازد. در سد شهید مدنی ۱۲۰ سلول فشار در قسمت‌های مختلف بدنه تعبیه شده‌اند که برای تعیین میزان تنش کل نقاط مختلف بدنهٔ سد استفاده می‌شوند. این سلول‌ها در خوشه‌های ۳ تایی قرار دارند و تنش‌ها را در ۳ جهت (دو جهت افقی، یک جهت عمودی) اندازه‌گیری می‌کنند. مقدار تنش‌های عمودی به‌دست‌آمده توسط سلول‌های فشار و تحلیل عددی در هستهٔ سد به‌ترتیب در پنج مقطع سد در جدول (٤) آورده شده‌است.

جدول ٤ مقایسهٔ تنش‌های قائم بدنهٔ سد ده سال پس از پایان ساخت در مقطع A، B، C، D و E

شمارهٔ سلول‌ها	محل نصب	فاصله از محور (متر)	تراز نصب	ابزار دقیق		آنالیز عددی	
				تنش کل قائم	A_r	تنش کل قائم	A_r
APC.1	مرکز هسته	۰/۷٤	۱٤۹۰/۰۷	۱۸۱	۰/٦۸	۲۱۳	۰/۸
APC.2	پایین‌دست هسته	-٦/٦۸٥	۱٤۷٥/۳٥	۳٦٥	۰/٦۷	٤٦۰	۰/۸٦
APC.3	بالادست هسته	٦/۷٥٤	۱٤۷٥/۹	۳٥۱	۰/٦٥	٤٤٥	۰/۸۳
BPC.1	مرکز هسته	۰/۰۷٥	۱٤۹۰/۱	۱۸۹	۰/۷۳	۲۳٤	۰/۸۸
BPC.3	دست هسته‌پایین	-۹/٥٤	۱٤٦۹/۷۹	٤۱۹	۰/٦٤	٥٥۹	۰/۸٦
BPC.4	بالادست هسته	۱۰/۳۰	۱٤٦۹/۷۹	٤۱۳	۰/٦۳	٥٥۲	۰/۸٥
BPC.7	دست هسته‌پایین	-۱۷/۰٦	۱٤٥٤/۳۳	٥٦٥	۰/٦	۷۹۰	۰/۸۳
BPC.8	مرکز هسته	۰/۳٦	۱٤٥٤/٤٥	٦۱٥	۰/٦٥	۸۲۰	۰/۸۷
BPC.9	بالادست هسته	۱۸/۰۲	۱٤٥٤/٤۸	٥۸۰	۰/٦۱	۸۰۰	۰/۸٥
BPC.11	دست هسته‌پایین	-۱٦/۲	۱٤۳۹/۲۰٥	۸۰٥	۰/٦٥	۱۰۹٥	۰/۸۹
BPC.12	مرکز هسته	۰/۰۸	۱٤۳۹/۱٦٤	۸۸۰	۰/۷۱	۱۱۲۰	۰/۹۱
BPC.13	بالادست هسته	۱٦/۸۱	۱٤۳۹/۱٦۱	۸٤٥	۰/٦۸	۱۱۰۰	۰/۸۹
CPC.1	مرکز هسته	۰/٥	۱٤۹۰/۱۱	۱۹۲/٤	۰/۷۳	۲٤۰	۰/۹
CPC.3	دست هسته‌پایین	-۱۰/٥٤	۱٤۷۰/۰۳٦	٤۳۰	۰/٦٦	٥۸۳	۰/۹
CPC.4	بالادست هسته	۱۰/۲٤	۱٤٦۹/۹۳٥	٤۱۹/۳	۰/٦٥	٥۷۹	۰/۸۹
CPC.7	دست هسته‌پایین	-۱٦/۹۲	۱٤٥٤/٦٤۹	٥۷٥	۰/٦۱	۸۰٥	۰/۸٥
CPC.8	مرکز هسته	۰/٤۹۲	۱٤٥٤/٦٦	٦۳۰/۱۸	۰/٦۷	۸٤٥	۰/۹
CPC.9	بالادست هسته	۱۷/۹٥	۱٤٥٤/٦۲۹	٥۹۱/٦	۰/٦۳	۸۱۲	۰/۸٦
CPC.12	دست هسته‌پایین	-۲۰/۰۲	۱٤۳۰/۹۰۹	۱۰۰۸/۳	۰/۷۲	۱۲٥۰	۰/۹
CPC.13	مرکز هسته	۰	۱٤۳۱	---	---	۱۲۷۰	۰/۹۱
CPC.14	بالادست هسته	۲۰/۳	۱٤۳۱/۳۲۱	۱۰۷۰/٥	۰/۷۷	۱۲٥٥	۰/۹۰
CPC.16	دست هسته‌پایین	-۲۰/٤۳	۱٤۲۰/۲۹٤	۱۲۰٥	۰/۷٥	۱٤۲٥	۰/۸۹
CPC.17	مرکز هسته	۱/۲۱	۱٤۲۰/٥٥	۱۱٥۰	۰/۷۲	۱٤٤۰	۰/۹۰
CPC.18	بالادست هسته	۱۹/۸٤	۱٤۲۰/۲۹٦	۱۱٦۰	۰/۷۲	۱٤۲۰	۰/۸۹
DPC.1	مرکز هسته	۰/٤	۱٤۹۰/۱۱	۱۸٤	۰/٦۹	۲۲٦	۰/۸٥
DPC.3	دست هسته‌پایین	-۱۰/٦۹	۱٤۷۰/۱۱	٤۱۷	۰/٦٥	٥٥۱	۰/۸٥
DPC.4	بالادست هسته	۱۰/۷۷	۱٤۷۰/۱٥۹	٤۰۸	۰/٦۳	٥٤٤	۰/۸۳
DPC.9	دست هسته‌پایین	-۱۷/۹۱	۱٤٥٤/٤۲۲	٥٦۰	۰/٦	۷۸٥	۰/۸۳
DPC.10	مرکز هسته	۰/۳٥۲	۱٤٥٤/٤۸۸	٦۰٥	۰/٦٤	۸۲۰	۰/۸۷
DPC.11	بالادست هسته	۱۷/۹٦	۱٤٥٤/۱۷	٥۷٥	۰/٦	۷۹۰	۰/۸۳
DPC.6	دست هسته‌پایین	-۱۷/۱٥	۱٤۳۹/۱٥۸	۷۹۰	۰/٦٤	۱۰۸۰	۰/۸۷
DPC.7	مرکز هسته	۰/۱۸	۱٤۳۹/۰٤٤	۸٥۰	۰/٦۸	۱۱۰۰	۰/۸۹
DPC.8	بالادست هسته	۱۷/۰۷	۱٤۳۹/۱۲۹	۸۲۲	۰/٦٦	۱۰۷۰	۰/۸۷
EPC.1	مرکز هسته	۰/۰٤۹	۱٤۸۹/۹٦	۱۷٥	۰/٦٥	۲۰٤	۰/۷٦
EPC.2	دست هسته‌پایین	-٦/۸۸	۱٤۷۹/۸٤٦	۳٤٥	۰/۷٥	٤۱۱	۰/۸۹
EPC.3	بالادست هسته	٦/۷۳	۱٤۷۹/۹۰۷	۳۲۱	۰/۷	٤۰٤	۰/۸٦

نشان‌دهندۀ PC: Vibrating Wire Pressure Cell سلول‌های فشار است که در پنج مقطع A، B، C، D و E نصب شده‌اند. همان‌طور که در نتایج نشان داده شده‌است مقدار تنش های عمودی کل در سلول‌های فشار، کمتر از مقدار به‌دست‌آمده از تحلیل عددی است. تفاوت اندکی بین تنش‌های عمودی مشاهده‌شده و محاسبه‌شده وجود دارد. دلایلی همچون کالیبراسیون برای تنش اعمالی و دما یک کار دشوار و گران است، به‌طوری‌که عدم کالیبراسیون و تخریب ابزارها ممکن است فرض شود همچنین برای جلوگیری از آسیب به سلول‌های تحت فشار، خاک اطراف سلول‌ها با تراکم کمتری در مقایسه با سایر قسمت‌های هسته فشرده شد. بنابراین، قوس موضعی در محل ابزارها منجر به تغییر مدول کشش و چگالی در اطراف سلول‌های فشار می‌شود [17]. ماکزیمم مقدار تنش کل حاصل از قرائت ابزار سلول‌های فشاری و تحلیل عددی در محل اتصال هسته به پی، به‌ترتیب ۱۲۰۵ و ۱٤٤۰ کیلوپاسکال است. به‌دلیل گذشت زمان و عمل تحکیم مصالح هسته تناسب بسیار خوبی بین دادها وجود دارد. تنش عمودی کل، عامل اصلی جلوگیری از ایجاد ترک در هسته است. در زمان پایان ساخت و اولین آبگیری مخزن، کاهش تنش عمودی در اثر پدیدۀ قوس می‌تواند ترک‌های افقی ایجاد کند زیرا فشار آب بیشتر از مقدار تنش عمودی است. این ترک ها که هیدرولیکی خوانده می‌شوند، از بالادست به پایین‌دست سوراخ ایجاد می‌کنند. همچنین، آسیب جدی به بدنۀ سد وارد می‌کنند و احتمالاً منجر به خرابی سد می‌شوند. مصالح استفاده شده در پوستۀ سدهای سنگ‌ریزه‌ای سخت‌تر از مصالح استفاده شده در هستۀ سدها هستند. تفاوت مدول الاستیسته بین این دو نوع مواد، گرایش‌های مختلفی را برای نشست ایجاد کرده‌است. علاوه‌بر این، اصطکاک بین مواد هسته و پوسته باعث انتقال تنش از هسته به پوسته می‌شود که می‌تواند یک منطقۀ کم‌تنش در هسته ایجاد کند. به این پدیده، قوس‌زدگی در سدهای خاکی می‌گویند.

معادلۀ (۱) نسبت قوس‌زدگی را ارائه می‌دهد [18].

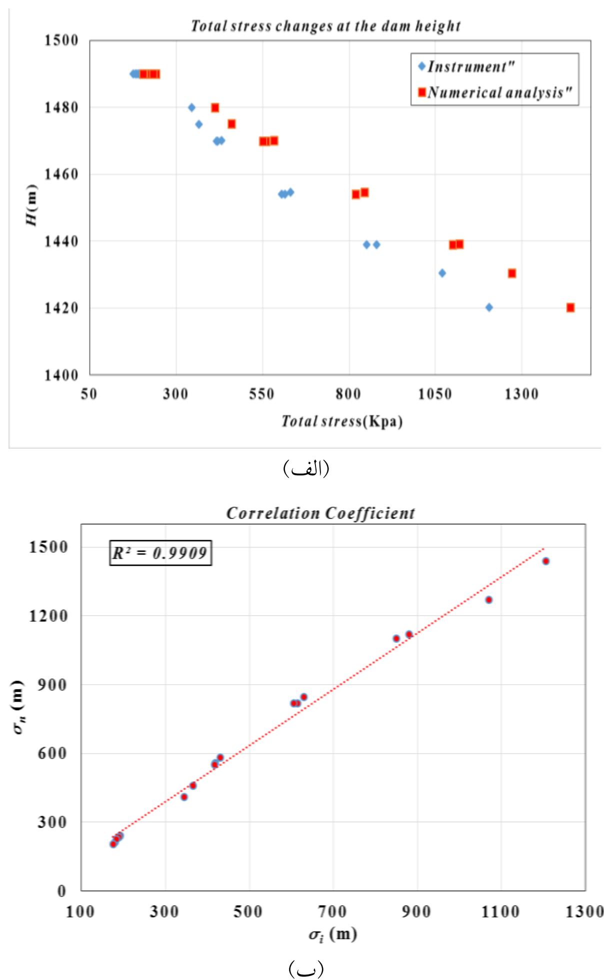
$$A_r = \left(\frac{\sigma_v}{\gamma * h}\right) \quad (۱)$$

σ_v : رابطۀ تنش قایم

γ : وزن مخصوص

h: ارتفاع خاک

برای جلوگیری از ایجاد قوس در هسته، نسبت قوس باید در محل سلول‌های فشار در هسته کمتر از ۱ باشد. هرچه A_r بیشتر باشد (نزدیک به یک)، وقوع پدیدۀ قوس‌زدگی در هسته کمتر و احتمال شکست هیدرولیکی کمتر است [18]. در جداول (٤) تفاوت معناداری بین نسبت ضریب قوس‌زدگی به‌دست‌آمده از داده‌های ابزار و محاسبه‌شده توسط تحلیل عددی دیده می‌شود. این به تفاوت تنش‌های عمودی به‌دست‌آمده توسط سلول‌های فشار و تحلیل عددی اشاره دارد .علاوه‌بر این، ماکزیمم نسبت قوس در سد شهید مدنی حاصل از قرائت ابزار دقیق و تحلیل عددی به‌ترتیب ۰/۷۷ و ۰/۹۱ بود که هر دو کمتر از یک است، بنابراین احتمال وقوع قوس در هسته وجود ندارد. این امر نشان می‌دهد که سد از نظر شکست هیدرولیکی در محدودۀ امن قرار دارد. در شکل (٦) به‌ترتیب منحنی‌های تغییرات تنش کل در ارتفاع بدنۀ سد و ضریب همبستگی بین داده‌های حاصل از نتایج ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی بدنۀ سد ارائه شده‌است.



شکل ٦ (الف) تغییرات تنش کل عمودی، (ب) ضریب همبستگی منحنی

ضریب همبستگی بین داده‌های تنش کل حاصل از نتایج ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی، ۹۹/۰۹ صدم درصد می‌باشد که نشان‌دهندهٔ همبستگی بسیار مناسب بین دادهای تنش کل می‌باشد. باتوجه به تحلیل‌ها می‌توان نتیجه گرفت که خواص مصالح از دقت مناسبی برخوردار است و منشأ خطا در تنش‌های محاسبه‌شده نیست.

تغییرات فشار منفذی. فشار منفذی یکی از مسائل مهم در مهندسی مکانیک خاک است. تغییرات فشار منفذی در سدهای خاکی به عواملی مانند میزان فشار سربار، سرعت خاک‌ریزی، شرایط زهکشی، نفوذپذیری، میزان اشباع و تراکم خاک بستگی دارد. افزایش فشار منفذی باعث کاهش مقاومت برشی خاک و به خطر افتادن پایداری سد می‌شود. بنابراین با کنترل سرعت خاک‌ریزی در زمان ساخت، می‌توان سرعت افزایش فشار منفذی را کنترل کرد. در سد شهید مدنی از پیزومترهای الکتریکی و کاساگرنده برای تعیین میزان فشار منفذی در تراز مختلف استفاده شده‌است. در سدهای خاکی و سنگی، به‌دلیل تغییرات تراکم مصالح هسته و فونداسیون، متشکل از مواد ریزدانه با نفوذپذیری کم و بار ناشی از آن، فشار اضافی آب ایجاد می‌شود. این فشار منفذی، به‌ویژه در هستهٔ سد که نفوذپذیری بسیار کمی دارد و زه کشی آن کم است، در طول ساخت سد منجر به افزایش فشار منفذی می‌گردد که ممکن است با کاهش تنش مؤثر منجر به گسیختگی برشی ناحیهٔ هسته شود. در این تحقیق، تغییرات فشار منفذ ناشی در پنج محور اصلی بدنهٔ سد مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته‌است. با نتایج پیزومترهای نصب‌شده در بدنهٔ سد، به‌دلیل عرض زیاد هستهٔ رسی، نفوذپذیری کم مواد ریزدانه و تراکم مناسب مصالح هسته، فشار منفذی اضافی بدنهٔ سد ایجاد شده‌است. ماکزیمم فشار منفذی ایجادشده طی ده سال پس از پایان ساخت در سطوح پایین‌تر هسته در محل اتصال هسته به فونداسیون مشاهده شده‌است. ضرایب فشار منفذی از معادلات (۲) و (۳) قابل محاسبه است:

$$r_u = \left(\frac{u}{\gamma * h}\right) \quad (۲)$$

$$R_u = \left(\frac{u}{\sigma_v}\right) \quad (۳)$$

u: فشار آب منفذی در نقطهٔ مورد نظر

γ : وزن واحد مخصوص

h : ضخامت لایهٔ خاک بالاتر از نقطهٔ مورد نظر

σ: تنش عمودی کل در نقطهٔ مورد نظر

ثبات نسبی ru در طول و انتهای ساخت، سرعت مناسب ساخت را نشان می‌دهد و بنابراین احتمال، شکست هیدرولیکی بدنهٔ سد را نتیجه می‌دهد. علاوه‌بر این، مقدار پایین R_u نشان‌دهندهٔ قابلیت اطمینان بالا در برابر شکست هیدرولیکی به‌دلیل پدیدهٔ قوس‌دهی است. ارزش R_u به‌طور کلی بیش از r_u در هسته است. در جدول (۵) تغییرات نسبت فشار منفذی به‌ترتیب در مقاطع B، C و D براساس قرائت پیزومترهای الکتریکی (VP) و پیزومترهای کاساگرانده (SP) و نتایج حاصل از تحلیل عددی آورده شده‌است.

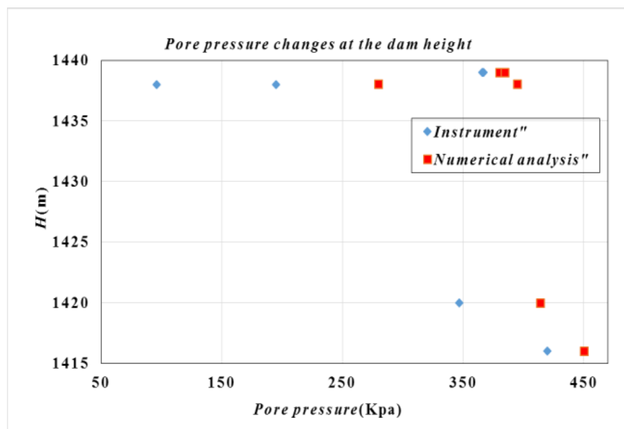
نتایج نشان می‌دهد که r_u مشاهده‌شده و محاسبه‌شده در پایان ساخت، سازگاری خوبی با هم دارند. تفاوت بین R_u مشاهده‌شده و محاسبه‌شده به‌دلیل تفاوت بین تنش‌های عمودی مشاهده شده و محاسبه شده‌است. حداکثر R_u حاصل از تحلیل عددی و ابزار دقیق نصب‌شده در هسته به‌ترتیب ۰/۳۵ و ۰/٤۷می‌باشد. طبق گزارش فنی سد شهید مدنی [19]، R_u پیش‌بینی‌شده در مرحلهٔ طراحی ۰٫۵ برآورد شده که از نظر مقاومت در برابر شکست هیدرولیکی ایمنی سد تأمین شده‌است.

در شکل (۷) به‌ترتیب منحنی‌های تغییرات فشار منفذی در ارتفاع بدنهٔ سد و ضریب همبستگی بین داده‌های حاصل از نتایج قرائت پیزومترهای الکتریکی و تحلیل‌های عددی ارائه شده‌است.

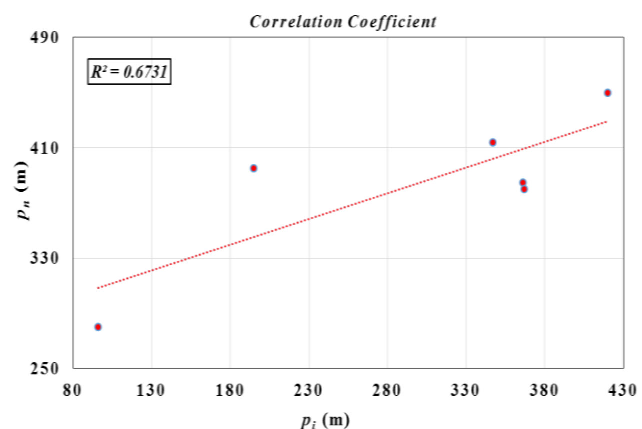
ماکزیمم فشار منفذی هستهٔ رسی براساس تحلیل عددی و قرائت پیزومترهای نصب‌شده در بدنهٔ سد به‌ترتیب ٤۵۰ و ٤۲۰ پاسکال است که در پایین‌ترین تراز سطح هسته رخ داده‌است. به‌دلیل گذشت زمان و عمل تحکیم مصالح هسته تناسب بسیار خوبی بین دادها وجود دارد. ضریب همبستگی بین داده‌های فشار منفذی حاصل از نتایج پیزومترها و تحلیل‌های عددی، ٦۷/۳۱ صدم درصد می‌باشد که نشان‌دهنده همبستگی مناسب بین دادهای فشار منفذی می‌باشد. تفاوت ضریب همبستگی و تفاوت‌هایی بین فشار منفذی ثبت‌شده توسط ابزارها و تحلیل عددی می‌تواند به‌علت نسبت اشباع و نفوذپذیری در طول مدل‌سازی عددی در هسته ثابت در نظر گرفته شود، درحالی که در حقیقت، این دو پارامتر به‌علت ارتفاع سد تغییر می‌کنند.

جدول ۵ مقایسهٔ نسبت فشار منفذی پیزومترهای ارتعاشی و کاساگرانده با نتایج تحلیل عددی ده سال پس از پایان ساخت در مقطع B، C و D

شمارهٔ پیزومتر	محل نصب	فاصله از محور(متر)	تراز نصب	فشار منفذی		r_u		R_u	
				ابزار دقیق	آنالیز عددی	ابزار دقیق	آنالیز عددی	ابزار دقیق	آنالیز عددی
BVP.7	پایین‌دست هسته	−۱۷/۳۶	۱۴۳۹/۱۸	۳۵۸/۶	۳۷۵	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۴۴	۰/۳۴
BVP.8	مرکز هسته	۰/۴۸	۱۴۳۹/۱۶	۳۶۰/۲	۳۸۰	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۴	۰/۳۳
BVP.9	بالا دست هسته	۱۶/۴۹	۱۴۳۹/۲۲	۳۶۶/۵	۳۸۵	۰/۲۸	۰/۲۹	۰/۴۳	۰/۳۵
BSP.1	پایین‌دست هسته	−۱۵	۱۴۳۸	۱۷۵	۳۸۰	۰/۱۳	۰/۲۸	-	۰/۳۴
BSP.2	مرکز هسته	−۳/۱۹	۱۴۳۸	۱۶۱	۳۸۳	۰/۱۲	۰/۲۸	-	۰/۳۳
BSP.3	بالا دست هسته	۱۳/۳۸	۱۴۳۷	۱۹۵	۳۹۵	۰/۱۴	۰/۲۹	-	۰/۳۵
CVP.10	پایین‌دست هسته	−۲۰/۶	۱۴۲۰/۵۲	۳۴۰	۴۰۲	۰/۲	۰/۲۴	۰/۲۸	۰/۲۸۲
CVP.11	مرکز هسته	۰/۴۲۲	۱۴۲۰/۵۸	۳۲۸	۳۹۶	۰/۱۹	۰/۲۳	۰/۲۸	۰/۲۷
CVP.12	بالا دست هسته	۲۰/۲۵	۱۴۲۰/۲۹	۳۴۷	۴۱۴	۰/۲	۰/۲۴	۰/۲۹	۰/۲۹
CSP.1	پایین‌دست هسته	−۱۶/۲۴	۱۴۱۶/۷	۴۰۳	۴۳۸	۰/۲۲	۰/۲۵	-	۰/۲۹
CSP.2	مرکز هسته	−۳/۸۰	۱۴۱۶/۷	۳۹۲	۴۲۵	۰/۲۲	۰/۲۴	-	۰/۲۸
CSP.3	بالا دست هسته	۱۵/۹	۱۴۱۶/۷	۴۲۰	۴۵۰	۰/۲۳	۰/۲۵	-	۰/۳
DVP.4	پایین‌دست هسته	−۱۶/۴۲	۱۴۳۹/۱۴	۳۷۷/۷	۳۵۵	۰/۲۸	۰/۲۷	۰/۴۷	۰/۳۲
DVP.5	مرکز هسته	۰/۱۲	۱۴۳۹/۰۲	۳۵۲	۳۶۳	۰/۲۶	۰/۲۷۵	۰/۴	۰/۳۳
DVP.6	بالا دست هسته	۱۷/۱	۱۴۳۹/۱	۳۶۱/۱	۳۸۰	۰/۲۷	۰/۲۸	۰/۴۳	۰/۳۵
DSP.1	پایین‌دست هسته	−۱۴/۹۱	۱۴۳۸	۹۶	۳۵۸	۰/۰۷	۰/۲۷	-	۰/۳۳
DSP.2	مرکز هسته	−۲/۹۲	۱۴۳۹	۸۶	۳۶۳	۰/۰۶	۰/۲۷۵	۰/۱	۰/۳۳
DSP.3	بالا دست هسته	۱۴/۸۵	۱۴۳۹	۸۶	۳۸۰	۰/۰۶	۰/۲۸	۰/۱	۰/۳۵



(الف)



(ب)

شکل ۷ (الف) تغییرات فشار منفذی، (ب) ضریب همبستگی منحنی

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، ده سال پس از اتمام ساخت بدنهٔ سد شهید مدنی، تحلیل‌های عددی واقعی بدنهٔ سد همزمان با ارزیابی و پایش نتایج انجام شده‌است. باتوجه به قرائت ابزارهای نصب‌شده و تحلیل‌های عددی سه‌بعدی بدنه و تکیه‌گاه سد، نتایج به‌دست آمده از این مطالعه به شرح زیر است:

۱. ده سال پس از اتمام ساخت بدنهٔ سد، میزان نشست عمودی براساس قرائت ابزار دقیق و تحلیل عددی به‌ترتیب ۱۹۰ و ۱۷۹ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده‌است. میزان نشست عمودی حاصل از نتایج ابزار دقیق در همهٔ مقاطع بیشتر از میزان تحلیل عددی است، که این مسئله ناشی از وقوع چندین زمین‌لرزهٔ طبیعی در منطقهٔ آذربایجان طی ده سال گذشته است. ضریب همبستگی بین داده‌های نشست حاصل از نتایج ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی برای پنج مقطع ابزارگذاری‌شده ۸۳/۸ صدم درصد می‌باشد که نشان‌دهندهٔ همبستگی مناسب بین داده‌های نشست می‌باشد.

۲. ده سال پس از ساخت بدنهٔ سد، حداکثر تنش عمودی کل ناشی از قرائت ابزارهای سلول فشاری و تحلیل عددی در بدنهٔ سد شهید مدنی در محل اتصال هسته به‌ترتیب ۱۲۰۵ و ۱٤٤۰ کیلوپاسکال به‌دست آمده‌است که نشان‌دهندهٔ تناسب بین دو مقدار فوق است. ضریب همبستگی بین داده‌های تنش کل حاصل از نتایج ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی، ۹۹/۰۹ صدم درصد می‌باشد که نشان‌دهندهٔ همبستگی بسیار مناسب بین داده‌های تنش کل می‌باشد. نسبت قوس در سد شهید مدنی بین ۰/٦ تا ۰/۷۷ می‌باشد که کمتر از مقدار ۱ می‌باشد بنابراین، سد از نظر خرابی هیدرولیکی به‌دلیل قوس‌زدگی در پایان ساخت در منطقه‌ای امن قرار دارد.

۳. در سد شهید مدنی به‌دلیل گذشت ده سال از پایان ساخت و هم‌چنین وجود سطح بالای آب زیرزمینی در منطقه در اثر سطح آب رودخانه و هم‌چنین عرض وسیع هسته، فشار منفذی ایجاد شده‌است. ماکزیمم فشار منفذی ناشی از قرائت پیزومترهای نصب‌شده در هسته و تحلیل عددی به‌ترتیب ٤۲۰ و ٤٥۰ کیلوپاسکال می‌باشد. ضریب همبستگی بین داده‌های فشار منفذی حاصل از نتایج ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی، ٦۷/۳۱ صدم درصد می‌باشد که نشان‌دهندهٔ همبستگی مناسب بین داده‌های تنش کل می‌باشد. به‌منظور جلوگیری از افزایش فشار منفذی در حین عملیات آبگیری و جلوگیری از وقوع خرابی هیدرولیکی در بدنهٔ سد، عملیات آبگیری مخزن سد باید به‌صورت کنترل‌شده انجام گردد. مقادیر فشار منفذی به‌دست‌آمده از تحلیل عددی و پیزومترها در پایان ساخت، سازگاری خوبی با هم داشتند. تفاوت بین R_u مشاهده‌شده و محاسبه‌شده به‌دلیل تفاوت بین تنش‌های عمودی مشاهده‌شده و محاسبه‌شده بودند. حداکثر R_u محاسبه‌شده و ثبت‌شده توسط ابزارها در هستهٔ سد به‌ترتیب ۰/۳٥ و ۰/٤۷ می‌باشد، R_uپیش‌بینی‌شده در مرحلهٔ طراحی ۰/٥ بود، بدین صورت استحکام سد در برابر شکست هیدرولیکی تأمین می‌گردد.

مراجع

1. Javanmard, M., Amiri, F., Safavi, S. M., "Instrumentation Readings Versus Numerical Analysis of Taham Dam", *International Journal of Engineering*, Vol. 32, No. 1, pp. 28-35, (2019).
2. Hossein, S., Etemadifar, M., Aghamolaie, I., "Monitoring of Masjed Soleyman Dam Based on Instrumentation Data", *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, Vol. 4, No. 5, pp. 78-99, (2017).
3. Derakhshandi, M., Pourbagherian, H., Baziar, M., Shariatmadari, N., Sadeghpour, A., "Numerical Analysis and Monitoring of a Rock Fill Dam at the End of Construction", *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 175-199, (2014).
4. Yu, Y., Zhang, B., Yuan, H., "An Intelligent Displacement Back-Analysis Method for Earth-Rockfill Dams", *Computers and Geotechnics*, Vol. 34, pp. 423-434, (2007).
5. Komasi, M., Mazaheri, A. R., Beiranvand, B., "Numerical Analysis of the Arching Effect of Ayoshan Dam in the First Dewatering Period and Its Comparison with Accurate Instrument Results", *Journal of Water and Soil Conservation Research*, Vol. 26, No. 6, pp. 79-97, (2019).
6. Bharti, M. K., Sharma, M., Nazrul, Islam, "Study on the Dam & Reservoir, and Analysis of Dam Failures", *International Research Journal of Engineering and Technology*, Vol. 07, No. 05, pp. 303−317, (2020).

7. Zhenyu, W., Chen, C., Xiang, L., Liang, P., Limin, Z., "Discussion on the Allowable Safety Factor of Slope Stability for High Rock Fill Dams in China", *Journal of Elsevier Engineering Geology*, Vol. 272, pp. 220−235, (2020).
8. Soroush, A., Aghaei, Araei A., "Analysis of Behaviour of a High Rockfill Dam", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers -Geotechnical Engineering ICE Virtual Library*, Vol. 159, No. 1, pp. 49-59, (2006).
9. Pramthawee, P., Jongpradist, P., Kongkitkul, W., "Evaluation of Hardening Soil Model on Numerical Simulation of Behaviors of High Rockfill Dams", *Songklanakarin Journal. Sci. Technol,* Vol. 33 No.3, pp. 325-334, (2011).

Mazaheri, A. r., Alipour, R., Shokri Derivand, B., "Study the Monitoring and Numerical Analyses of Rock fill Dam (Case Study of Marvak Dam in Lorestan, Iran)", *Civil Infrastructure Researches*, Vol. 5, No.2, pp. 153-164, (2020).

10. Rashidi, M., Mohsen Haeri, S. M., "Evaluation of Behaviors of Earth and Rockfill Dams during Construction and Initial Impounding Using Instrumentation Data and Numerical Modeling", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,* Vol 9, No. 4, pp. 709–725, (2016).
11. Komasi, M., Beiranvand, B., "Evaluation of Pore Water Pressure Foundation and Core of Sivand Dam after the First Dewatering Period in Comparison with the Actual Instrument Results", *Journal of Iranian Dam and hydroelectric power plant*, Vol.6, No, 21, pp. 66-73, *(2019).*
12. Ghanbari, A. and Shams Rad, S., "Development of an Empirical Criterion for Predicting the Hydraulic Fracturing in the Core of Earth Dams", Acta Geotechnica. pp. 1-12, (2013).
13. Ghods-Niroo consultant engineers Co, "Technical Report on the Studies of the Second Phase of Shahid Madani Dam", Tehran, (2002).
14. Mauriya Kumar, V., "Geotechnical Instrumentation in Earth and Rock-Fill Dams", *Indian Geotechnical Conference,* Vol. 10, pp.1027-1030, (2010).
15. Lefebvre, G., Duncan, J., Wilson, E., "Three-Dimensional Finite Element Analysis of Dams", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division,* Vol. 99, No. SM7, pp. 495-507, (1973).
16. Dunnicliff, J., Green, G., Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance: A Wiley Inter-science Publication, (1988).
17. Terzaghi, K., "Theoretical Soil Mechanics", New York, (1943).
18. Ghods-Niroo consultant engineers Co, "Technical Report on the Instrumentation of the Body of Shahid Madani Dam", Tehran, (2013).
19. Beiranvand, B., Komasi, M., "Monitoring and Numerical Analysis of Pore Water Pressure Changes Eyvashan Dam during the First Dewatering Period", *Journal of Applied Research in Water and Wastewater,* Vol.6, No.11, pp.1-7, (2019).
20. Geological Report of Shahid Madani Dam Engineering, Ghods-Niroo Consultant Engineers Co, Tehran, (2002).
21. Ghiasi, V., Heidari, F., Behzadinezhad, H., "Numerical Analysis and Back Calculation for Embankment Dam Based on Monitoring Results (Case Study: Iran-Lurestan Rudbar)", *Sharif University of Technology Scientia Iranica. Transactions A: Civil Engineering,* Vol.28, No. 5, pp.2519−2533, (2021).
22. Ghods-Niroo Consultant Engineers Co, "Technical Review of Numerical Analyzes to Control the Static and Dynamic Stability of Shahid Madani Dam", Tehran, (2009).

23. Henkel, D, "The Shear Strength of Saturated Remolded Clays, in Proceedings of the ASCE Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soil", *Boulder, Colorado,* pp. 533-554, (1960).
24. Hongqi, M., Fudong, Chi, "Major Technologies for Safe Construction of High Earth-Rockfill Dams", *Science Direct Engineering,* Vol. 2, No. 4, pp. 498–509, (2016).
25. Lifeng Wen, MEng Junrui Chai, Xiao Wang, MEng Zengguang Xu, Yuan Qin, Yanlong Li, "Behaviour of Concrete-Face Rockfill Dam on Sand and Gravel Foundation", *Geotechnical Engineering,* Vol. 168, No. 5, pp. 439-456, (2015).
26. Mahinroosta, R., Alizadeh, A., Gatmirib, B., "Simulation of Collapse Settlement of First Filling in a High Rockfill Dam", *Geotechnical Engineering,* Vol. 187, pp. 32-44, (2015).
27. Nazari Giglou, A., Panahi, A., Solari, L., Bombar, G., "Assessment of Static and Dynamic Behaviour of Emarat Earth Dam by Finite Difference Method", *Journal of Civil Engineering and Urbanism,* Vol. 7, No. 1, pp. 01-11, (2017).
28. Sehra, R. S, Gupta, S. L, "Instrumentation of Earth & Rock Fill Dams", *International Journal of Engineering and Applied Sciences,* Vol. 5, No. 3, pp. 277-298, (2018).
29. Sigtryggsdóttir, F. G., Snæbjörnsson J. Th., Sigbjörnsson R., Grande L., "Rockfill Dam SETTLEMENT Data: Processing and Statistical Analysis", The 3rd International Symposium on Rock fill Dams, Chincold Hydropower, (2013).
30. Sivasuriyan, A., Vijayan, D., Munusami, R., Devarajan, P., "Health Assessment of Dams under Various Environmental Conditions Using Structural Health Monitoring Techniques: A State-of-Art Review", *International Research on Sustainable Developments for Environment Management,* Vol. 5, pp. 455−464, (2021).
31. Terzaghi, K., "Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door", *in Proceeding of First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, Massachusetts,* Vol. 1, pp. 307-311, (1963).
32. Yongkang, W., Bingyin, Z., Yuzhen, Y., Zongliang, Z., "Consolidation Analysis of Nuozhadu High Earth-Rockfill Dam Based on the Coupling of Seepage and Stress-Deformation Physical State", *International Journal of Geomechanics,* Vol. 16 Issue 3, pp. 05-19, (2016).
33. Yongkang, W., Huina, Y., Bingyin, Z., Zongliang, Z., Yuzhen, Y., "Displacement-Based Back-Analysis of the Mode Parameters of the Nuozhadu High Earth-Rockfill Dam", *Hindawi Publishing Corporation the Scientific World Journal,* pp. 77-88, (2014).